

原著論文

スポーツパフォーマンスと関連する動作における
Model-based Image-matching Technique の信頼性笹 木 正 悟¹⁾ 松 田 匠 生²⁾
櫻 井 敬 晋¹⁾ 福 林 徹³⁾Reliability of a Model-based Image-matching Technique for the Movement Related to Sports Performance
Shogo Sasaki¹⁾, Takumi Matsuda²⁾, Takakuni Sakurai¹⁾, Toru Fukubayashi³⁾¹⁾ Department of Judothrapy, Faculty of Health Sciences, Tokyo Arikake University of Medical and Health Sciences, Tokyo, Japan²⁾ Graduate School of Sport Sciences, Waseda University, Saitama, Japan³⁾ Faculty of Sport Sciences, Waseda University, Saitama, Japan

Abstract : Recently, a Model-based Image-matching (MBIM) technique has been developed for objective evaluation of human movement using video sequences. It will be possible to get new findings about high-quality movement which conducted in a real game situation. The main purpose of this study was to assess the intra- and inter-tester reliability of a MBIM technique using sports movement related to performance in game situation. Intra- and inter-rater correlations results were > 0.91 for trunk, hip and knee flexion angles. Therefore, it is considered that a MBIM method can apply to the movement related to sports performance.

key words : video analysis, reliability, sports performance, Model-based Image-matching

要旨：近年、ビデオ映像を用いた他覚的な運動評価方法としてModel-based Image-matching(MBIM)Techniqueが考案された。フィールドスポーツのパフォーマンス評価にMBIM法を用いることで、これまでに明らかにされていなかった実際の競技現場で生じる質の高い運動について、新たな知見を得ることが出来る。本研究は、試合で生じたパフォーマンスに関連するスポーツ動作にMBIM法を適用したときの検者内および検者間信頼性を検討することを目的とした。体幹部屈曲角度、股関節屈曲角度、膝関節屈曲角度の級内相関係数は > 0.91 と非常に高い信頼性が得られた。このことから、パフォーマンスと関連するスポーツ動作にMBIM法を応用できる可能性が示唆された。

キーワード：ビデオ分析, 信頼性, スポーツパフォーマンス, Model-based Image-matching

I. 緒 言

サッカーやラグビー、バスケットボールといったフィールドスポーツは、陸上競技や競輪といった個人スポーツに比べてパフォーマンスの評価が非常に困難である。その理由として、個人スポーツはゴールまでの着順や所要時間、到達距離といった明確な記録により優劣が評価される一方で、フィールドスポーツはチーム全体の得点数によってのみ勝敗を決するからである。そのため、フィー

ルドスポーツでは相手チームによる自責点などにより試合に勝利することが出来たとしても、その試合における選手のパフォーマンスが必ずしも優れていたとは限らない。現場の指導者やコーチングスタッフは、試合成績だけでなく実際のゲーム内容や個人戦術などを総合的に判断して、パフォーマンスの優劣や選手起用などを決定していく。

フィールドスポーツの指導者は、身体的スキル、心理的スキル、戦術的スキル、技術的スキルという4つの側面

¹⁾ 東京有明医療大学保健医療学部柔道整復学科E-mail address : sasaki@tau.ac.jp²⁾ 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科³⁾ 早稲田大学スポーツ科学学術院

から選手のパフォーマンスを評価するといわれている¹⁾。その中でも、スポーツの技術的スキルを客観的に評価する手法としてバイオメカニクス的アプローチは非常に有用である。これまでも、様々なスポーツ動作や身体活動に対して、運動力学変数を用いた分析が多数行われている。しかしながら、先行研究では主に反射マーカを貼付した状態で規定された運動を行う光学的動作解析が用いられており、これらは実際の試合で生じるより複雑かつダイナミックな動きを全く同様に再現しきれないという点に限界がある。

その一方で、現場の指導者はしばしば、試合や練習の映像を用いて動作の特徴やフォームなどをチェックする。ビデオ映像を用いたコーチングは、実験室的な擬似空間では再現不可能である多様なシーンを選手にフィードバックする上で役立つ。試合というリアリティの高いシチュエーションでの動作情報を提示することは、選手が実際の試合でどのように運動を遂行すべきなのかを学習させ、選手のパフォーマンスを向上させるために極めて重要であるといわれている²⁾。これらのことから、試合を撮影したビデオ映像はフィールドスポーツのパフォーマンス評価に広く用いられている。しかしながら、これまでのビデオ分析は指導者による視覚的評価や主観的評価が多く、試合中の動作について生体力学的な観点から捉えた客観的データは乏しい。

ビデオ映像を用いた分析は、トレーニングやコーチングを扱うスポーツ科学分野以外でも用いられている。スポーツ医学の分野では、特に膝前十字靱帯損傷の発生メカニズムを解明する取り組みとして、1990年代から積極的に映像を使ったビデオ分析が行われている。そこでは、主に受傷状況の分析^{3, 4)}や受傷時の関節角度の視覚的評価⁴⁻⁷⁾が行われてきた。しかしながら、ビデオ映像を用いた視覚的分析では、光学的手法を用いた膝関節屈曲角度の分析結果と比べて約2分の1の角度に見積もられていたと報告されている⁴⁾。このことから、視覚的分析は有用である一方で精度上の限界があり、ビデオ分析の精度を向上させるためにはより他覚的に評価できる方法が必要である⁸⁾。

近年、ビデオ映像を用いた他覚的な運動評価方法としてModel-based Image-matching (MBIM) Techniqueが考案され⁹⁾、スポーツ傷害のメカニズム分析において貴重なデータを示している¹⁰⁻¹⁴⁾。しかしながら、ビデオ映像を用いた他覚的な分析手法はスポーツ医学分野での活用にとどまっており、試合やトレーニングでのリアリティの高い運動を対象としたスポーツ科学領域における運動解析にはまだ応用されていない。フィールドスポーツのパフォーマンス評価にMBIM法を用いることで、これまで明らかにされていなかった実際の試合や競技場面で生じる質の高い運動について、新たな知見を得ることが出来る。また、科学的根拠に基づいたパフォーマ

ンスの「評価」を行うためには、検査・測定に用いる手法の「信頼性」を検証し、その妥当性と問題点を把握した上で適用することが非常に重要であると考えられる。

そこで本研究は、MBIM法をスポーツのパフォーマンス評価に応用するための基礎研究として、試合で生じた動作に対してMBIM法を適用した時の検者内および検者間信頼性を検討することを目的とした。

II. 方 法

1. 対 象

解析に用いた映像は、関東大学サッカー連盟主催の競技大会で撮影された1対1の守備局面を捉えたシーンであった。なお、本映像はペナルティーアーク付近のバイタルエリアにて撮影された。解析の対象は、関東1部リーグ登録の大学サッカー部に所属している男性1名(年齢:20歳、身長:177.0cm、体重:67.0kg)とした。なお、対象者は関東大学選抜チームに選出される競技レベルであり、ポジションはMFであった。

対象者にはあらかじめ実験内容および実験により起こりうる危険性について十分に説明したうえで参加の同意を得た。また、本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、東京有明医療大学倫理審査委員会(承認番号:東京有明医療大学倫理審査委員会承認第13号)の承認を得て実施した。

2. 映像収集および編集

関東大学サッカー連盟が主催する試合を、観客席スタンドおよびピッチ場外から6台のデジタルビデオカメラ(Sony HDR-FX1, Tokyo, Japan; Sony HDR-CX370, Tokyo, Japan; Panasonic NV-GS320, Tokyo, Japan, Panasonic NV-GS500, Tokyo, Japan)を用いて90分間撮影した。ビデオ映像のサンプリング周波数は30Hz、解像度は標準画質(480i)にて撮影された。撮影されたビデオ映像のうち、対象者の動作が同時に且つ鮮明に記録されている4台のビデオ映像を選定した。全てのビデオ映像の画質は基本的に良好であったが、瞬間的に素早い動作を行った際の身体部分には若干のぼやけがみられた。

撮影されたビデオ映像は、画質を下げないよう非圧縮AVI(Audio Video Interleave)映像に変換して抽出された。抽出された4つの映像は、Adobe After Effect(version 7.0, Adobe Systems Inc, San Jose, California)を用いて非圧縮TIFF(Tagged Image File Format)に変換された後、1つの映像として同期化された。手動で行われた4つの映像の同期化は、それぞれに映っているキーイベント(ドリブルでのボールタッチ、方向変換での接地・離地)を用いて行われた。

3. Model-based Image-matching

ビデオ映像から対象者の3次元キネマティクスを再構

築する新たな手法として、Model-based Image-matching (MBIM)法が用いられた⁹⁾。MBIM法には、市販の3DCGソフトウェアであるPoser 4 およびPoser Pro Pack(Curious Labs, Inc, USA)が用いられる。このソフトウェアパッケージの利点は、①複数の図形アイテム(平面図形-四角形、円形/立体図形-柱体、錐体、球体)を作成できること、②ビデオ動画映像を直接インポート出来ること、③最大4台までのカメラ視野を分割表示できること、④並進3自由度・回転3自由度を持ち、焦点距離が可変であるカメラモデルを作れること、⑤男性や女性、スケルトンなどといったカスタムモデルを挿入できること、があげられる。これらの利点を活かし、ビデオ映像に映っているスポーツ環境を点や線(直線・曲線・円)の図形アイテムとカメラモデルを用いてパーソナルコンピュータ上に再構築できることがMBIM法の最大の特徴である。本研究では、ビデオ映像が撮影された国立西が丘サッカー場のコートにあわせて、105m×68mのサッカーコートを点や線の図形アイテムを用いて作成した。解析は、Dell Precision TM 380(DELL Japan Inc, Japan)およびFlex Scan S2433W-HX(EIZO NANA O Co, Japan)を用いて行われた。

対象者のマッチングに用いる骨格モデルは、Zygotte Skeleton Model(Zygotte Media Group, Inc, Provo, USA)を使用した。この骨格モデルは、断層的構造となっている21の体節(前足部、後足部、下腿、大腿、骨盤、腹部、胸部、頸部、頭部、肩部、上腕、前腕、手部)から構成

されており、骨盤が親セグメントとなっている。親セグメントである骨盤は、静止座標系を回転3自由度、並進3自由度にて動かすことができ、それ以外のセグメントは、それぞれの親セグメントに対して回転3自由度にて動かすことが可能である。骨格モデルの各体節の寸法は、撮影後に実施された身体計測値をもとに、対象者の骨格に合わせて調整された。

Model-based Image-matchingは、事前に作成したサッカーコートモデルや骨格モデルをビデオ映像に映っている背景や人の動きに適合するよう手動でマッチングさせることで、過去に生じた対象者の運動やカメラワークをパーソナルコンピュータ上で再構築させるという手法である(図1、図2)。複数台のカメラ映像から捉える背景をフレームごとにマッチングさせていくことで、移動・回転・ズームを含めたビデオカメラの動きを再構築することが可能となる。この再構築されたビデオカメラの動きの中で、骨格モデルのマッチングは親セグメントである骨盤から開始する。その後、下肢であれば大腿→下腿→足部へと、体幹・上肢であれば腹部→胸部→上腕→前腕へと、徐々に遠心方向へ向かってマッチングを行っていく。すべてのフレームにおいてサッカーコートモデルと骨格モデルが正確にマッチングするまで作業を継続し、マッチングされた各フレームを連続再生することで動的な動きが再現化される。

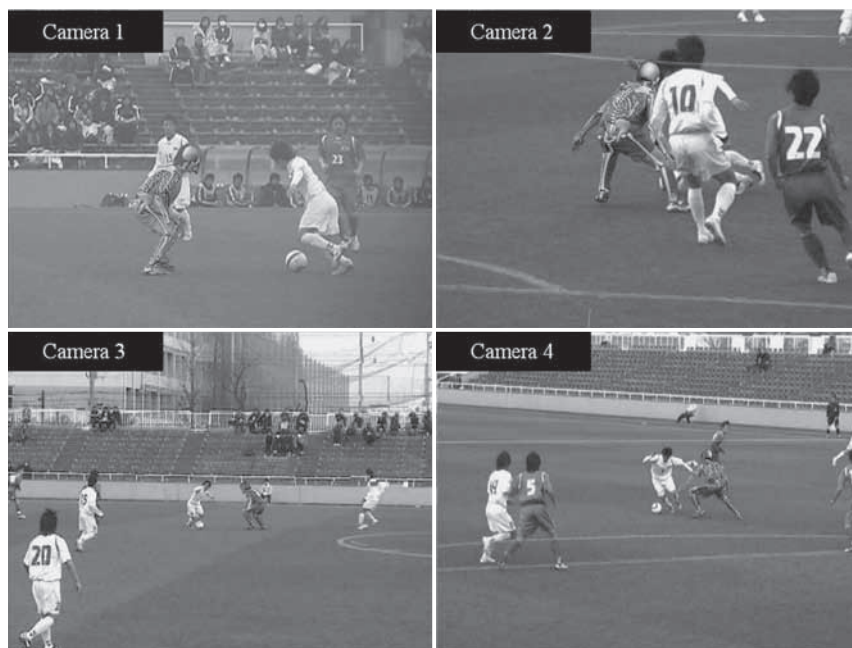


図1 Model-based Image-matching法を用いて背景および骨格モデルをマッチングさせる

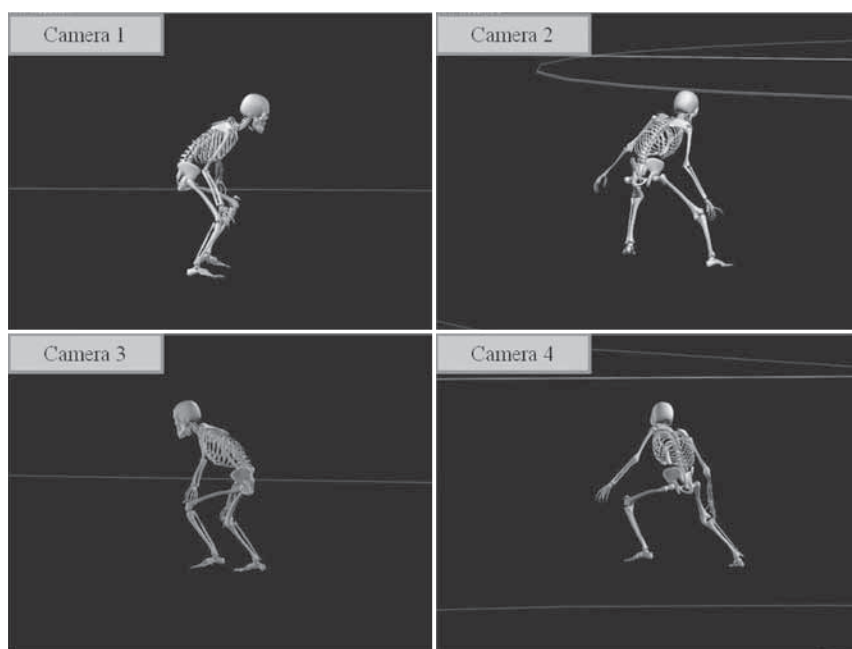


図2 再構築された試合中に生じたスポーツ動作

4. 関節角度の算出

関節角度を算出するに当たり，体幹部は腹部および胸部の動きを1つのセグメントとして定義された．そのため，体幹部のマッチングは腹部と胸部の動きが均等の割合になるように行われた．また，先行研究⁹⁾と同様に膝関節の内反・外反の動きは生じないものとし，股関節を回旋させることで至適なマッチングを行った．

膝関節および股関節の座標系はGroodらの定義¹⁵⁾に従い，体幹部は骨盤に対する動きとして評価された．MBIM

法において体幹部および大腿の位置は，骨盤の剛体に対する体幹部および大腿の長軸によって成す角度で表される．つまり，骨盤の剛体の y-z 平面上の角度を体幹部屈曲角度および股関節屈曲角度，x-z 平面上の動きを体幹部側屈角度および股関節内外転角度，x-y 平面上の動きを体幹部回旋角度および股関節回旋角度とした．また，膝関節の位置は大腿の剛体に対する下腿の長軸によって成す角度を膝関節屈曲角度とした(図3)．また，体幹部，股関節，膝関節の関節角度は，先行研究⁹⁻¹⁴⁾と同様にカス

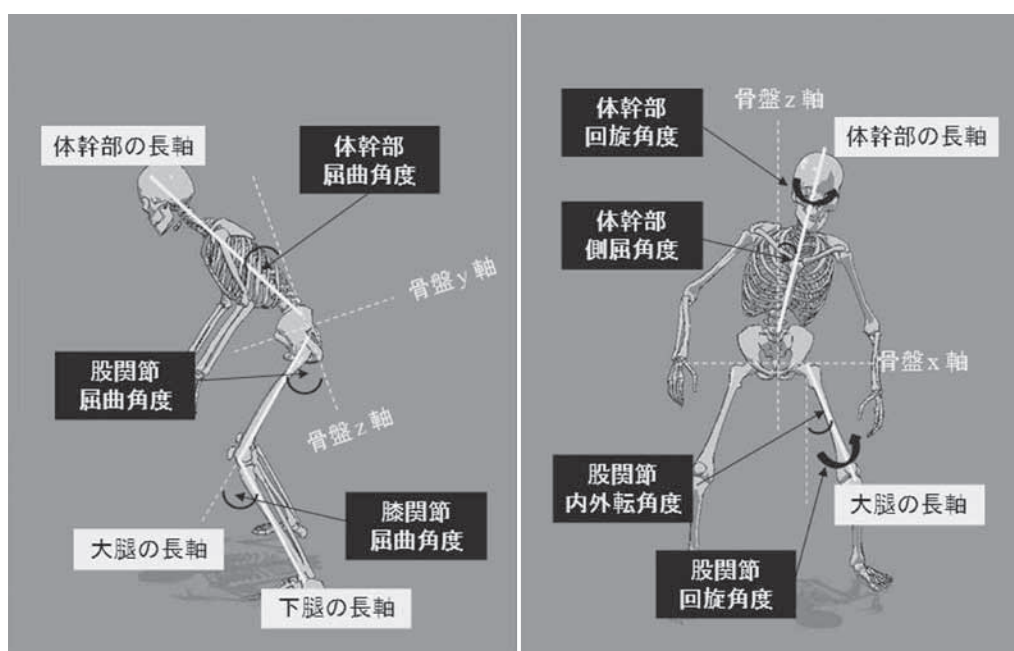


図3 Model-based Image-matching法における関節角度の算出

タマイズされたMatlab Script(Math Works, Natick, USA)を用いて算出された。

5. 分析項目

検者内の信頼性を検討するために、背景および骨格モデルのマッチングを同一検者により5回実施した。また、検者間の信頼性を検討するために、2名の異なる検者によるマッチングを1回ずつ実施した。信頼性の検討は、方向変換を行っている脚である右股関節屈曲角度、右股関節内外転角度、右股関節回旋角度、右膝関節屈曲角度および体幹部屈曲角度、体幹部側屈角度、体幹部回旋角度について行われた。

6. 統計処理

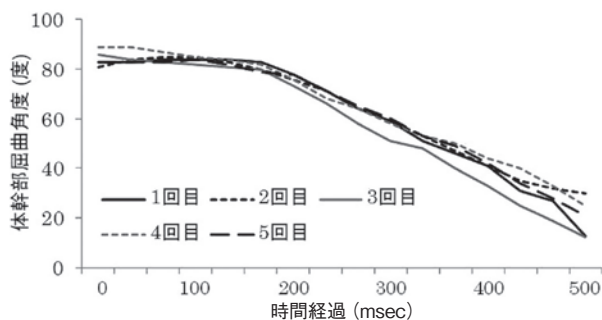
統計的検定量の算出にはIBM SPSS statistics(ver.19.0 for Windows)を用いた。検者内信頼性(Intra-rater reliability)を検討するために、級内相関係数ICC(1,1)を求めた。また、検者間信頼性(Inter-rater reliability)を検討するために、級内相関係数ICC(2,1)を求めた。

III. 結 果

同一検者により実施された級内相関係数ICC(1,1)を表1に示した。体幹部屈曲角度、股関節屈曲角度、膝関

表1 Model-based Image-matching法における検者内信頼性

		ICC(1,1)	95% 信頼区間	
			下限値	上限値
体幹部	屈曲角度	0.97	0.95	0.99
体幹部	側屈角度	0.69	0.49	0.85
体幹部	回旋角度	0.83	0.70	0.92
股関節	屈曲角度	0.94	0.88	0.97
股関節	内外転角度	0.85	0.74	0.94
股関節	回旋角度	0.88	0.77	0.95
膝関節	屈曲角度	0.93	0.87	0.97



(a) 同一検者が5回マッチングした時の経時的角度変化

節屈曲角度の級内相関係数は > 0.93 と非常に高く、体幹部側屈角度以外の級内相関係数も > 0.83 と高い信頼性を示した。体幹部側屈角度の級内相関係数は $=0.69$ と最も低かった。同一検者がマッチングを実施した経時的角度変化の典型例として、級内相関係数 $ICC(1,1) = 0.97$ であった体幹部屈曲角度を図4(a)に示した。

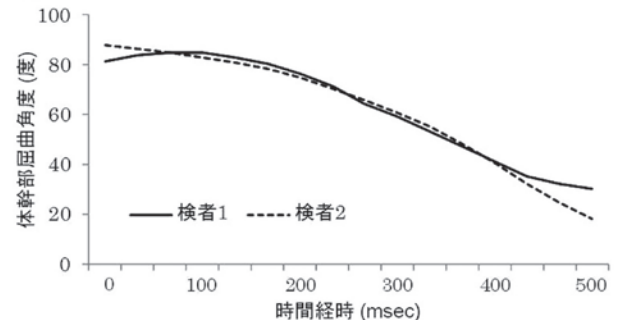
2名の検者により実施された級内相関係数 $ICC(2,1)$ を表2に示した。体幹部屈曲角度、股関節屈曲角度、膝関節屈曲角度の級内相関係数は > 0.91 と非常に高く、その他の運動の級内相関係数も > 0.84 と高い信頼性を示した。異なる検者がマッチングを実施した経時的角度変化の典型例として、級内相関係数 $ICC(2,1) = 0.98$ であった体幹部屈曲角度を図4(b)に示した。

IV. 考 察

本研究では、MBIM法をパフォーマンス評価に応用するための基礎研究として、試合で生じたパフォーマンスと関連するスポーツ動作にMBIM法を適用したときの検者内および検者間の信頼性を検討した。これまでのMBIM法を用いた映像分析は傷害発生シーンを分析した研究のみであり¹⁰⁻¹³⁾、より複雑かつ多様な様相を呈すると考えられる競技動作そのものにMBIMを適用した研究は過去に行われていない。競技パフォーマンスと関連のある運

表2 Model-based Image-matching法における検者間信頼性

部位および運動		ICC (2,1)	95% 信頼区間	
			下限値	上限値
体幹部	屈曲角度	0.98	0.94	0.99
体幹部	側屈角度	0.85	0.64	0.94
体幹部	回旋角度	0.92	0.80	0.97
股関節	屈曲角度	0.98	0.94	0.99
股関節	内外転角度	0.84	0.60	0.94
股関節	回旋角度	0.90	0.74	0.96
膝関節	屈曲角度	0.91	0.76	0.96



(b) 異なる2名の検者が1回ずつマッチングした時の経時的角度変化

図4 検者内および検者間信頼性を検討した際の体幹部屈曲角度。

動にMBIMを適用したときの信頼性が確認されれば、ビデオ映像を用いて様々な質の高い運動分析に本手法を応用することが可能であると考えられる。また、MBIM法を適用したときの信頼性を検討することで、本手法の特性や限界、さらにはマッチングのポイントなどが顕在化され、より客観性の高いデータを得るための一助になりうると考えられる。これらのことは、柔道整復師がアスリートに対する後療法(運動療法)を行う過程の中で、スポーツ現場で生じる動作の動態を正しく把握し、安全かつ適切な動作の習得を再教育させるための指標ならびに競技復帰の目安になることが期待される。

本研究で用いた「分析の信頼性」を表す級内相関係数(Intraclass correlation coefficient: ICC)は、検者内および検者間の一致度を示すものであり、これまでも身体角度計測の信頼性を確認する研究などにおいても広く用いられている¹⁶⁻¹⁸⁾。また、級内相関係数は理学療法の研究報告において最も多用されている信頼性係数であると言われている¹⁹⁾。級内相関係数の判定基準は先行研究においてもいくつかの基準で分類されており^{20, 21)}、Blesh²²⁾はExcellent(0.90-0.99)、Good(0.80-0.89)、Fair(0.70-0.79)、Poor(≤ 0.69)と定義している。本研究では、同一の映像を1人の検者が5回繰り返し解析したときの検者内信頼性としてICC(1,1)を、同一の映像を2人の検者が1回ずつ解析したときの検者間信頼性としてICC(2,1)をそれぞれ算出した。

パフォーマンスに関連するスポーツ動作として、本研究ではペナルティーアーク付近のバイタルエリアにおける1対1守備の方向変換を用いた。日本サッカー協会は「JFA 2005年宣言」の中で『世界のトップ10を目指して』という目標を掲げている。この目標を達成するための日本サッカーの課題の1つとして、個の守備力である1対1の強化があげられている^{23, 24)}。またGerischら²⁵⁾は、サッカーのゲーム中における1対1の状況をチームのパフォーマンスを評価する上で重要な要因として取り上げている。試合のビデオ映像を用いたゲーム分析においては、フェイントを用いてのドリブルが決定的なシュートやラストパスに繋がりやすい守備陣営の中央1/3で約50%行われていると報告されている²⁶⁾。藤岩²⁷⁾は、サッカーにおける失点シーンの特徴として、ペナルティーエリア中央およびバイタルエリアから打たれたシュートが全失点の約70%を占めると報告している。これらのことから、特にバイタルエリア付近でのドリブルからの1対1守備力を強化することが不要な失点を防ぐための一助になり、パフォーマンスに関連するスポーツ動作であると考えられる。

検者内および検者間信頼性ともに、主に矢状面での運動となる体幹部屈曲角度、股関節屈曲角度、膝関節屈曲角度の級内相関係数は > 0.91 と非常に高かった(表1、表2、図4)。このことは、MBIM法を競技動作に適用した

場合においても、特に矢状面上の運動については高い信頼性を持った結果を得ることができると示唆された。Krosshaugら⁹⁾は、反射球を用いた動作解析とMBIM法を用いた動作解析の適合性を同一映像にて比較しており、股関節および膝関節の屈曲角度における経時的角度変化の適合性は、内外転角度や回旋角度の経時的変化に比べてより類似すると報告している。また、デジタル映像を用いた簡易的な2次元動作解析においても、股関節屈曲角度の級内相関係数はICC(1,1)およびICC(2,1)ともに > 0.92 と非常に高い信頼性が得られている¹⁶⁾。これらのことから、実際の試合における方向変換にMBIM法を用いた映像解析は、矢状面の運動について十分な信頼性を有しており、MBIM法が他覚的なスポーツパフォーマンスの評価にも適応可能な手法であると考えられた。

前額面および水平面での運動についても、体幹部側屈角度のICC(1,1)以外の級内相関係数は > 0.83 であり、多くの運動について高い信頼性が得られた(表1、表2)。これらはBlesh²²⁾の判定基準においてもGood(0.80~0.90)に分類されることから、MBIM法は一定水準の信頼性を有しているものであると考えられる。光学的手法を用いた場合とMBIM法を用いた場合の股関節、膝関節における経時的角度変化の波形を比較すると、二乗平均平方根の差は2.6~15.7度の範囲で存在しているものの、全ての波形パターンは非常に類似した様相を示していた⁹⁾。このことは、傷害の発生シーンと同様に、ビデオ映像からスポーツパフォーマンスに関連した運動のキネマティクス特性を描写するのに適した手法であると考えられる。Krosshaugら⁹⁾は、MBIM法の精度を高めるためのポイントとして、2台以上の直行する視野からの映像を用いることを推奨している。本研究では、対象者の側方、後方、後外方から撮影された4つのビデオ映像を用いており、より精度を高めて解析できる環境が整っていた。このことは、本研究において比較的高い級内相関係数が導出された理由の1つであると推察される。今後の研究においてもより信頼性の高いデータを得るためには、意図するシーンを撮影できるようにビデオの配置等の環境を事前に整備する必要があると考えられる。

しかしながら、体幹部側屈角度の検者内信頼性は $= 0.69$ であり、十分な信頼性を得ることができなかった(表1)。その理由として、骨盤をマッチングできる精度の限界が考えられる。本研究で用いたような体幹部を屈曲させている動作では、静止座標系における骨盤の回旋角度が体幹部の側屈角度に大きく影響していると考えられる(図5)。MBIM法の手順として、最初に親セグメントである骨盤の座標位置および傾斜・回旋を決定し、その後、末梢セグメントである体幹部および四肢を順次マッチングさせていく。その際に、骨盤のマッチングが不適切であると、その他のセグメントのキネマティクスにも影響が及ぶと考えられる。Krosshaugら⁹⁾は骨盤のマッチング



図5 骨盤のマッチングの違いによって生じた体幹部側屈の誤差。外見上は同様のマッピングに見えるが、左図は骨盤を66度回旋させた状態で体幹部を0度側屈させ、右図は骨盤を72度回旋させた状態で体幹部を7度側屈させている。

が最も誤差が大きいセグメントであることを述べており、特に骨盤回旋については光学的手法を用いた場合と比較して最大で21.6度の二乗平均平方根の差異が生じていたことを報告している。骨盤の形状は姿勢の解釈が非常に難しい⁹⁾ことに加え、骨盤のランドマークが衣服に覆われていることがマッピングをさらに困難とさせている。このことは、MBIM法の限界であり、分析者自身が細心の注意を払って行っていくべきポイントであると考えられる。Kogaら^{12,13)}は1人の分析者によるバイアスを最小限にするため、複数の専門家によるマッピングの適合性の確認作業を行っている。MBIM法は視覚的評価に比べれば客観的ではあるものの、分析者の作業技術がマッピングの性能に依存すると言われている¹²⁾。これらのことから、骨盤を慎重にマッピングさせることに加えて、単独の分析者によるマッピングの適合評価を避けることがMBIM法の信頼性をさらに向上させるポイントであると示唆された。

しかしながら、本研究で用いた級内相関係数(Intraclass correlation coefficient: ICC)を解釈するにあたっては、いくつかの注意が必要である。まず、検者内信頼性の評価指標として用いたICC(1,1)はあくまでも検者1人の測定結果より導きだされているため、検者の特性やバイアスが大きく反映されていると考えられる²⁰⁾。また、検者間信頼性の指標として用いたICC(2,1)においては、検者2名がそれぞれ1回ずつ行った測定結果より導き出されているため、偶然の一致を否定しきれない。今後は、MBIM法の信頼性をさらに向上させるため、測定の回数や測定を行う検者数を増加させることで、より客観性の高いデータを示していく必要があると考えられた。

V. 結 語

1. 本研究では、実際の試合中に生じたパフォーマンス

と関連するスポーツ動作にMBIM法を適用したときの検者内および検者間信頼性について検討した。

2. 矢状面上の運動となる体幹部屈曲角度、股関節屈曲角度、膝関節屈曲角度の級内相関係数は> 0.91と非常に高く、その他の運動においても0.69~0.92と比較的高い信頼性が得られた。
3. MBIM法を実施する際のポイントとして、分析者自身が意図する映像を撮影できる環境を整備すること、骨盤を慎重にマッピングさせていくこと、複数の検者による適合評価を行うことの重要性が示唆された。

謝 辞

本研究は、平成22年度東京有明医療大学特別研究費(10-00071)の助成を受け、実施されたものである。

参考文献

- 1) Carling C, Reilly T and Williams AM. Performance assessment for field sports. 1st edition. Oxford : Routledge, 2009. p.1-23.
- 2) Hughes MD and Franks M. National Analysis of Sport : System for better coaching and performance. London : E&FN Spon; 2004. p.17-40.
- 3) Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball : a systematic video analysis. American Journal of Sports Medicine 2004 ; 32(4) : 1002-1012.
- 4) Krosshaug T, Nakamae A, Boden BP, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball : video analysis of 39 cases. American Journal of Sports Medicine 2007 ; 35(3) : 359-367.
- 5) Ettlinger CF, Johnson RJ and Shealy JE. A method to help reduce the risk of serious knee sprains incurred in alpine skiing. American Journal of Sports Medicine 1995 ; 23(5) : 531-537.
- 6) Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Jr., et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. Orthopedics 2000 ; 23(6) : 573-8.
- 7) Ebstrup JF and Bojsen-Moller F. Anterior cruciate ligament injury in indoor ball games. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports 2000 ; 10(2) : 114-116.
- 8) 中前敦雄, 越智光夫. 膝前十字靭帯損傷 - ACL損傷のビデオ分析. 臨床スポーツ医学臨時増刊号 2008 ; 25 : 105-108.

- 9) Krosshaug T and Bahr R. A model-based image-matching technique for three-dimensional reconstruction of human motion from uncalibrated video sequences. *Journal of Biomechanics* 2005 ; 38(4) : 919-929.
- 10) Krosshaug T, Slauterbeck JR, Engebretsen L, et al. Biomechanical analysis of anterior cruciate ligament injury mechanisms: three-dimensional motion reconstruction from video sequences. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 2007 ; 17(5) : 508-519.
- 11) Fong DT, Hong Y, Shima Y, et al. Biomechanics of supination ankle sprain: a case report of an accidental injury event in the laboratory. *American Journal of Sports Medicine* 2009 ; 37(4) : 822-827.
- 12) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries : knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *American Journal of Sports Medicine* 2010 ; 38(11) : 2218-2225.
- 13) Koga H, Bahr R, Myklebust G, et al. Estimating anterior tibial translation from model-based image-matching of a noncontact anterior cruciate ligament injury in professional football : a case report. *Clinical Journal of Sport Medicine* 2011 ; 21(3) : 271-274.
- 14) Mok KM, Fong DT, Krosshaug T, et al. An ankle joint model-based image-matching motion analysis technique. *Gait and Posture* 2011 ; 34(1) : 71-75.
- 15) Grood ES and Suntay WJ. A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions : application to the knee. *Journal of Biomechanical Engineering* 1983 ; 105(2) : 136-144.
- 16) 茶川知彰, 西上智彦, 榎 勇人ほか. 2次元での簡易的な身体角度計測の信頼性－臨床普及の観点から－. *理学療法学* 2007 ; 22(3) : 369-372.
- 17) Lunden JB, Muffenbier M, Giveans MR, et al. Reliability of shoulder internal rotation passive range of motion measurements in the supine versus sidelying position. *Journal of Orthopedic and Sports Physical Therapy* 2010 ; 40(9) : 589-594.
- 18) Wilk KE, Macrina LC, Fleisig GS, et al. Correlation of glenohumeral internal rotation deficit and total rotational motion to shoulder injuries in professional baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine* 2011 ; 39(2) : 329-335.
- 19) 対馬栄輝. 理学療法の研究における信頼性係数の適用について. *理学療法学* 2002 ; 17(3) : 181-187.
- 20) 今井 樹, 潮見泰蔵. 理学療法研究における“評価の信頼性”の検査法. *理学療法学* 2004 ; 19(3) : 261-265.
- 21) 対馬栄輝. SPSSで学ぶ医療系データ解析. 第6版. 東京 : 東京図書株式会社 ; 2007. p.195-214.
- 22) Blesh TE. *Measurement in Physical Education*. New York : The Ronald Press Company ; 1974.
- 23) 財団法人日本サッカー協会技術委員会U16指導指針ワーキンググループ. JFA 2004 U-16 指導指針. 東京 : 財団法人日本サッカー協会 ; 2004. p.26-51.
- 24) 財団法人日本サッカー協会技術委員会U16指導指針ワーキンググループ. JFA 2008 U-16 指導指針. 東京 : 財団法人日本サッカー協会 ; 2008. p.16-49.
- 25) Reilly T, Clary J and Stibbe A. *The 2nd World Congress on Science and Football ; 1st edition*. Eindhoven : E&FN Spon; 1993. p.167-173.
- 26) 松下健二, 高藤 順. 世界の一流サッカー選手にみられるフェイント技術に関する一考察. *実技教育研究* 2006 ; 20 : 69-78.
- 27) 藤岩秀樹. サッカーゲームにおける失点シーンの特徴. *宇部工業高等専門学校研究報告* 2006 ; 52 : 83-88.